بارگذاری انفجار و ارزیابی پاسخ غیرخطی سازه‌های ساختمانی در مقابل آن★

(یادداشت پژوهشی)

احمد فراهانی(۱)   محمد علی هادیان‌فرد(۲)

چکیده در شرایطی که حملات تروریستی به اماکن و تأسیسات غیرنظامی روندی افزایشی پیدا کرده‌است، توجه به طراحی ساختمان‌ها در مقابل بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار، از اهمیت بیشتری برخوردار است و توجهات و ملاحظات ویژه‌ای را می‌طلبد. شناسایی ماهیت بارهای انفجاری و نحوه‌ی اعمال آن بر سازه یکی از مسائل مهمی است که باید مورد مطالعه و توجه قرارگیرد. انفجار آزاد شدن ناگهانی و سریع حجم بسیار زیادی از انرژی است که تولید نور، گرما، صدا و موج ضربه‌ای می‌نماید. این موج شامل هوای بسیار متراکمی است که به‌صورت شعاعی و کروی با سرعتی در حدود سرعت صوت از منبع انفجار به‌سمت خارج حرکت می‌کند. اعمال این بار هولناک بر سازه باعث ایجاد تغییرشکل‌های زیادی در محدوده‌ی غیرخطی و خرابی قسمت‌هایی از سازه می‌گردد که انجام تحلیل‌های غیرخطی را ضروری می‌سازد. در این مقاله بارهای انفجاری و پارامترهای مهم انفجار معرفی شده‌اند و روابط و مدل‌های مختلف بارگذاری انفجاری مورد مطالعه و مقایسه قرار گرفته‌اند و مناسب‌ترین مدل برای محاسبه و اعمال این بارها بر سازه‌های ساختمانی شناسایی و مورد استفاده قرار گرفته‌است. سپس با به‌کارگیری نرم‌افزارهای تحلیل سازه، پاسخ غیرخطی قاب‌های مختلف ساختمانی در مقابل بارهای ضربه‌ای ناشی از انفجار محاسبه و مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. هم‌چنین با مقایسه‌ی رفتار غیرخطی قاب‌های ساختمانی با تعداد دهانه‌ها و طبقات مختلف، عوامل تأثیرگذار بر پاسخ سازه شناسایی و معرفی گردیده‌اند.

واژه‌های کلیدی تحلیل دینامیکی سازه، موج انفجار، سازه‌های ساختمانی، بارگذاری انفجاری، بارهای ضربه‌ای.

Blast Loading and Evaluation of Nonlinear Response of Structural Buildings

A. Farahani   M. A. Hadianfard

Abstract *In the conditions in which terrorist attacks on facilities and civilian places increase more and more attention to design of structures against impact loads of explosion is more important and needs special considerations. Study of nature of blast loads and methods of applying it on the structure is one of the important problems. Explosion is a sudden and rapid release of a great amount of energy that produces light, heat, voice and shock wave. This wave contains dense air that moves outward radially and spherically, with velocity about the sound speed. Applying this huge load on structure leads to nonlinear deformations and failure in some elements. Then using of nonlinear analysis is necessary. In this paper blast loads and it's parameters have been introduced, and different formulas and models for blast loading have been studied and compared, and the most suitable model for calculating and applying this load on the structural buildings has been recognized and used. Then by using structural analysis softwares, nonlinear response of different structural frames against blast loading, have been calculated and evaluated. Also with comparison of nonlinear behavior of structural frames with different stories and bays effective parameters on response of structures, have been recognized and introduced.*

Key Words Structural Dynamic Analysis, Blast Wave, Structural Buildings, Blast Loading, Impact Loads.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۲/۱۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۲/۲/۱۰ می‌باشد.

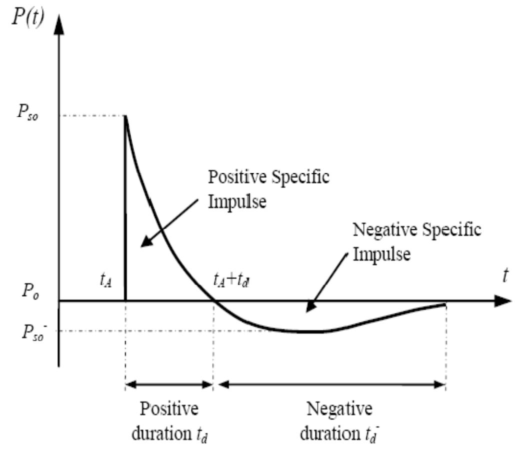
(۱) دانشجوی دکتری سازه، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی خاتم الانبیاء (ص)، بهبهان.

(۲) نویسنده‌ی مسؤول: دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز.

مقدمه

حادثه تخریب ساختمان دولتی فدرال امریکا در ایالت اوکلاهاما در سال ۱۹۹۵، که ناشی از انفجار ۱۸۱٤ کیلوگرم TNT در فاصله ٤/۷۵ متری بود [1]، موجب شد که بررسی انفجار و آثار مخرب آن بر ساختمان، مورد توجه ویژه قرار گیرد و منتج به چاپ مقالات و آیین‌نامه‌هایی در زمینه‌ی طراحی ساختمان‌ها و فضاهای شهری در مقابل انفجار گردید [2,3]. ولی آنچه در این آیین‌نامه‌ها به‌وضوح دیده می‌شود نوپایی و درحقیقت ضعف این آیین‌نامه‌ها در پاره‌ای از موارد، از جمله نحوه‌ی اعمال این بار بر سازه و موارد دیگری از این دست است.

در ضربه‌ی ناشی از انفجار زمان بارگذاری بسیار کوتاه است. همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در طول چند صدهزارم ثانیه، فشار از فشار اتمسفر(P_o)، به فشار بیشینه (P_{so}^+) می‌رسد و سپس در طول چند صدم ثانیه دوباره به فشار اتمسفر بازمی‌گردد، و در ادامه در طول چند دهم ثانیه فشار منفی (P_{so}^-) ایجاد می‌شود. فشار بیشینه‌ی ناشی از انفجار (P_{so}^+)، با دور شدن از مرکز انفجار به نحو چشم‌گیری کاهش می‌یابد، ولی برخلاف آن، دوره‌ی بارگذاری (زمان اثر بار ناشی از انفجار بر سازه) با دور شدن از مرکز انفجار افزایش می‌یابد [4].



شکل ۱ تصویر شماتیک تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار [4]

در بررسی‌های مربوط به انفجار، گام اول محاسبه و پیش‌بینی بار ناشی از انفجار بر روی ساختمان می‌باشد. برای نیل به این هدف آزمایش‌های میدانی زیادی صورت گرفته‌است که نتایج آن‌ها در مراجع متعددی آورده شده است [4,5]. هم‌چنین در این زمینه نرم‌افزارهایی نظیر نرم‌افزار ConWep که به‌وسیله‌ی اداره‌ی مهندسی ارتش ایالات متحده توسعه یافته است [4] و یا نرم‌افزار A.T.-Blast که توسط شرکت ARA تهیه شده است [6]، موجود می‌باشد. برای محاسبه‌ی بار ناشی از انفجار روش‌های دیگری نیز ارائه شده‌است که اکثر آن‌ها بر فرمول‌های تجربی استوار هستند. نخستین بار، بیشینه فشار انفجار، توسط براد (Brode) درسال ۱۹۵۵ ارائه گردید [7]. پس از آن روابط دیگری توسط سایر محققان نظیر نیومارک و هنسن [8] و هم‌چنین میلز [9] ارائه گردید . برای به‌دست آوردن زمان تداوم بارگذاری انفجار نیز روابط مختلفی توسط محققان ارائه گردیده است که از آن جمله می‌توان به روابط ارائه شده توسط مایز و اسمیت در سال ۱۹۹۵، لم و همکاران در سال۲۰۰٤ و ایزدی فرد و ماهری در سال ۲۰۱۰ اشاره نمود [10,11,12].

هم‌چنین در سال‌های اخیر محققانی نظیر لم و همکاران تلاش‌هایی برای دست‌یابی به روش‌های طیفی و تهیه‌ی طیف طراحی در مورد بارگذاری انفجاری انجام داده‌اند [11]. در زمینه‌ی اثر انفجار بر سازه‌های مختلف و رفتار ساختمان‌ها در مقابل این بارگذاری مطالعات زیادی توسط محققان صورت گرفته است [13,14]. نتایج این بررسی‌ها بیانگر این مسأله است که نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی اجزای محدود و نیز روش های تحلیلی که از روابط عددی استفاده می کنند، هم‌خوانی خوبی با نتایج آزمایشگاهی و میدانی دارند. در سال ۲۰۰۹ لی و همکاران اثر بار انفجار را بر ستون‌های فولادی با مقاطع مختلف بررسی نمودند [15]. در سال ۲۰۱۲ هادیان فرد و فراهانی تعداد مقاطع بیشتری از ستون‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند و رفتار غیرخطی آن‌ها را

مطالعه نمودند [16]. با توجه به استفاده‌ی روزافـزون از نرم‌افزارها برای تحلیل ساختمان‌هـا در مقابـل انفجـار، لازم است روش‌های مناسب برای برآورد بارهای ناشی از انفجار و نحوه‌ی اعمال آن بر سازه شناسایی گردد و دقت هر روش مورد ارزیابی قرار گیرد. این امر یکی از اهداف اصلی مقاله حاضر می‌باشد.

محاسبه‌ی مشخصات مربوط به بارهای ناشی از انفجار

برای محاسبه‌ی بار ناشی از انفجـار روش‌هـای زیـادی ارائه شده‌است، در واقع همه‌ی پارامترهـای مربـوط بـه انفجار وابسته به دو پارامتر مستقل هستند: یکـی میـزان مواد منفجره که بـا معـادل‌سـازی برحسـب وزن TNT معادل بیان می‌شود (W) و دیگری فاصله‌ی بـین مرکـز انفجار تا محل اثر مـوج انفجـار (R). حاصـل ایـن دو کمیت، به‌صورت پارامتر Z (فاصله مقیـاس شـده)، بـه شرح زیر بیان می‌شود:

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}$$

در رابطه‌ی بالا R بر حسب متر و W بـر حسـب کیلوگرم به‌کار می‌روند [13].

رابطه‌ی پیشـنهادی بـراد (Brode) بـرای بـرآورد فشار بیشینه‌ی ناشی از انفجار به‌صورت زیـر مـی‌باشـد [7]:

$$P_{so} = \frac{97.5}{Z} + \frac{145.5}{Z^2} + \frac{585}{Z^3} - 1.9 \quad kPa \qquad (۱)$$
$$(10\ kPa < P_{so} < 1000\ kPa)$$

$$P_{so} = \frac{670}{Z^3} + 100 \quad kPa \quad (P_{so} > 1000\ kPa) \qquad (۲)$$

هم‌چنین رابطه‌های پیشنهادی توسط نیومارک [8] و میلز [9] بـه‌ترتیـب در روابـط (۳) و (٤) نشـان داده شده است.

$$P_{so} = 678400 \frac{W}{R^3} + 930 \left(\frac{W}{R^3}\right)^{\frac{1}{2}} \quad kPa \qquad (۳)$$

$$P_{so} = \frac{108}{Z} - \frac{114}{Z^2} + \frac{1772}{Z^3}\ kPa \qquad (٤)$$

اگر موج انفجار در مسیر خـود بـه‌مـانع برخـورد کند، پدیده‌ی انعکاس موج، پیش‌خواهد آمد کـه میـزان این انعکاس، متناسب با زاویه ی برخورد موج، متفاوت خواهد بود. در صورتی که زاویه‌ی برخورد صفر باشـد (مانع موجود در مسیر، بر مسـیر حرکـت مـوج عمـود باشـد)، میـزان انعکـاس ایجـاد شـده، از رابطـه‌ی زیـر محاسبه می‌شود [13]:

$$P_r = 200P_{so}\left[\frac{7 + 4P_{so}}{7 + P_{so}}\right] \quad kPa \qquad (۵)$$

زمـان بارگـذاری t_d توسـط لـم و همکـاران به‌صورت رابطه‌ی لگاریتمی زیر پیشنهاد گردیده اسـت [11]:

$$\log_{10}\left(\frac{t_d}{W^{1/3}}\right) \approx -2.75 + 0.27\log_{10}\left(\frac{R}{W^{1/3}}\right) \quad (Z \geq 1/0) \qquad (٦)$$

$$\log_{10}\left(\frac{t_d}{W^{1/3}}\right) \approx -2.75 + 1.95\log_{10}\left(\frac{R}{W^{1/3}}\right) \quad (Z \leq 1/0) \qquad (۷)$$

هـم‌چنـین رابطـه‌ی جدیـدتر ارائـه شـده توسـط ایزدی‌فرد و ماهری مطابق زیر می‌باشد [12]:

$$\log_{10}\left(\frac{t_d}{W^{1/3}}\right) \approx 0.28 + 0.31\log_{10}\left(\frac{R}{W^{1/3}}\right) \quad (Z \geq 1/0) \qquad (۸)$$

$$\log_{10}\left(\frac{t_d}{W^{1/3}}\right) \approx 0.28 + 2.5\log_{10}\left(\frac{R}{W^{1/3}}\right) \quad (Z \leq 1/0) \qquad (۹)$$

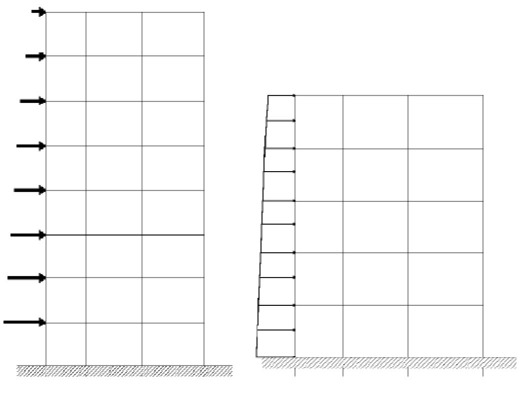
تاریخچه زمانی فشار ناشی از انفجار که در شکل (۱) نمـایش داده شـده اسـت، توسـط رابطـه نمـایی فرایدلنـدر (Friedlander) مطـابق رابطـه‌ی (۸) بیـان می‌شود [17]:

$$P_s(t) = P_{so}\left(1 - \frac{t-t_a}{t_d}\right)\exp\left(-b\frac{t-t_a}{t_d}\right) \qquad (۱۰)$$

که در آن t_a زمان رسیدن موج انفجار به سازه، t_d زمان بارگذاری و b ضریب کاهندگی است. فاکتور ضربه به‌صورت سطح زیر نمودار فشار- زمان می‌باشد (سطح زیر منحنی شکل (۱) در مدت زمان t_d)، که رابطه‌ی انتگرالی آن به قرار زیر است:

$$i_r = \int_{t_a}^{t_a+t_d} P_s(t)dt \quad (11)$$

در بسیاری از موارد، برای سهولت، نمودار $P_s(t)$ به‌صورت مثلثی فرض می‌شود (به عبارت دیگر تغییرات فشار با زمان خطی فرض می‌شود)، که در آن فشار اولیه‌ی P_{so} در مدت زمان t_d به صفر می‌رسد. بار انفجار به‌صورت باری گسترده بر نمای خارجی ساختمان اعمال می‌شود که مقدار آن با دور شدن از منبع انفجار کاهش می‌یابد. معمولاً توزیع این بار به‌صورت گسترده فرض می‌شود که در ارتفاع ساختمان به‌صورت خطی تغییر می‌کند. البته در برخی از تحقیقات این بار به‌صورت بارهای متمرکز در تراز هر طبقه قرار داده شده‌است. در شکل (۲) توزیع خطی و متمرکز بار در ارتفاع ساختمان نمایش داده شده است. در این مقاله، ابتدا برای انفجارهای مختلف و در فواصل متفاوت، بیشینه فشار و بیشینه فشار انعکاسی به‌وسیله‌ی نرم‌افزار A.T.-Blast و روابط بالا محاسبه شده و با هم مقایسه گردیده‌اند. پس از آن قاب‌های متفاوتی، هرکدام یک‌بار با بارهای متمرکز، و یک‌بار با بارهای گسترده‌ی خطی، با توزیع خطی در طول زمان، و یک‌بار با توزیع غیرخطی در طول زمان، تحلیل شده‌اند و نتایج مقایسه گردیده‌اند.



شکل ۲ انواع بارگذاری به‌صورت خطی و متمرکز

نحوه‌ی مدل‌سازی و تحلیل سازه‌های ساختمانی مختلف در نرم‌افزار

بارهای انفجاری به‌دلیل داشتن طبیعتی ضربه‌ای، در زمان بسیار کوتاهی به سازه اعمال می‌شوند و به همین دلیل با بارهای جانبی دیگر نظیر باد و زلزله متفاوت می‌باشند. در این مقاله برای بررسی بارهای ناشی از انفجار، ابتدا برای حدود پنج هزار موقعیت متفاوت در فواصل ۲ تا ۸۵ متری و حجم مواد منفجره از ۱۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرمی، فرمول‌های تجربی ذکر شده در بخش قبلی مقاله، محاسبه شده و نتایج حاصل از آن‌ها با نتایج حاصله از نرم‌افزار A.T.-Blast مقایسه گردیده‌است.

در مرحله‌ی بعد، سازه‌هایی که به‌صورت کامل و با رعایت تمامی ضوابط آیین‌نامه‌ای و برای بارهای لرزه‌ای طراحی گردیده‌اند، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. بدین منظور، قاب‌های سازه به‌صورت مجزا تحت بار ناشی از انفجار قرار داده شده‌اند و با بررسی نتایج، نکاتی درباره این نوع بارگذاری بیان گردیده‌است. سازه‌های ساختمانی مورد مطالعه، در شش حالت متفاوت، در دو، پنج و هشت طبقه و هر کدام یک‌بار با سه‌دهانه و یکبار با شش‌دهانه انتخاب شده‌اند. این ساختمان‌ها با اهمیت زیاد و در منطقه‌ای با خطر زلزله‌ی بسیار زیاد، قرار داشته وبا استفاده از فولاد نرمه ساختمانی با تنش جاری شدن f_y=235 MPa، ضریب پواسون μ=0.3 و مدول الاستیسیته E=200 GPa به‌صورت قاب خمشی ویژه‌ی فولادی طراحی گردیده‌اند. در شکل (۳) تصویرشماتیک قاب‌ها نشان داده شده‌است.

فرضیات به‌کار گرفته شده در تحلیل‌ها عبارتند از:

۱- بار ناشی از انفجاردر سه حالت متفاوت به سازه‌ها اعمال شده‌است؛ در حالت اول، بارگذاری با توزیع گسترده بر روی وجه ساختمان (وجه ستون) و از نظر تاریخچه زمانی مطابق با شرایط واقعی در نظر گرفته شده‌است. در حالت دیگر، بار انفجاری

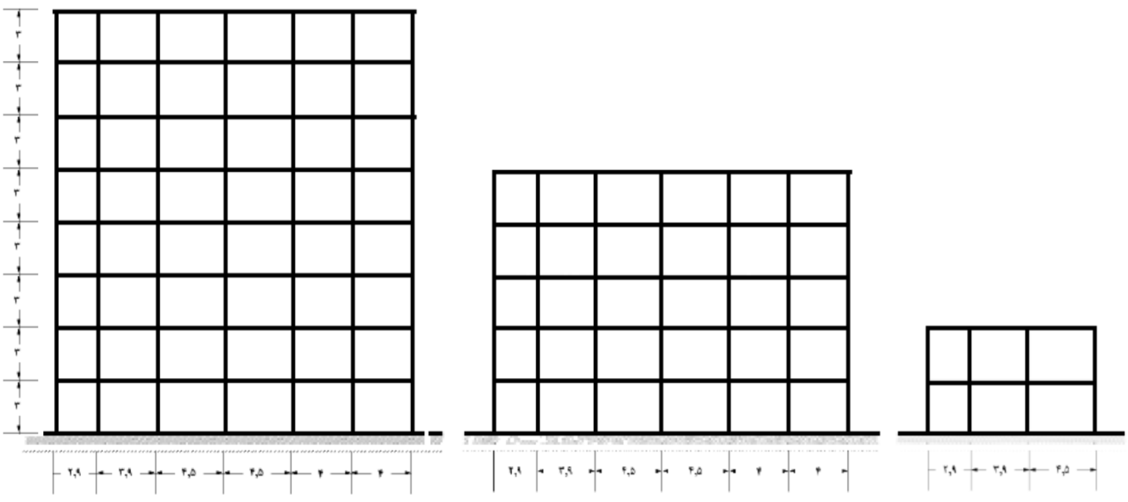
به‌صورت گسترده بر روی وجه ساختمان ولی با توزیع مثلثی در طول زمان و در حالت سوم، به‌صورت بار متمرکز از نظر تاریخچه زمانی مطابق با شرایط واقعی در تراز طبقات در نظر گرفته شده‌است. با توجه به جدول موجود در FEMA428 مواد منفجره یک خودرو سواری در حدود ۳۵ تا ۸۰ کیلوگرم خواهد بود که این بار در فاصله‌ای در حدود ۱۵ متر، باعث تخریب ستون‌های ساختمان خواهد شد [18]. در مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته‌ی اولیه این نتیجه تأیید شد و برای مواد منفجره در فواصل کمتر از ۳۰ متر، ستون‌های بیرونی کاملاً تخریب گردیدند. با توجه به این نکته و برای این‌که بتوان اثر نحوه‌ی اعمال بار ناشی از انفجار بر سازه را بررسی نمود و نیز به‌منظور بررسی رفتار غیرخطی سازه قبل از خرابی، در این مقاله بار مبنای طراحی، بار ناشی از انفجار یک خودرو با ۵۵ کیلوگرم TNT در فاصله ۴۰ متری در نظر گرفته‌شده است. نتایج حاصل از این تحلیل برای سازه‌های تحت اثر انفجارهای با فاصله‌ی متوسط از ساختمان (در حدود ۳۰ تا ۵۰ متر) دارای کاربرد می‌باشد.

۲- بار مؤثر بر هر قاب، با توجه به عرض باربر جانبی آن محاسبه شده‌است که عبارت است از مجموع نصف فاصله آن قاب تا قاب‌های کناری. هم‌چنین فرض شده‌است تمام بار ناشی از انفجار از طریق دیوارها به سازه منتقل گردیده‌است.

۳- نرم‌افزار مورد استفاده برای تحلیل قاب‌ها، نرم‌افزار ANSYS می‌باشد و تحلیل‌های صورت پذیرفته در آن به‌صورت دینامیکی تاریخچه زمانی و با درنظر گرفتن رفتار ارتجاعی- خمیری کامل برای فولاد و با استفاده از جعبه‌ی Explicit این نرم‌افزار انجام گرفته‌است.

٤- المان مورد استفاده در تحلیل BEAM189 می‌باشد که المانی با امکان رفتار غیرخطی، درجه دو و با شش درجه آزادی در هر گره به صورت سه درجه آزادی جابه‌جایی و سه درجه آزادی دورانی است [19].

۵- مقاطع مورد استفاده در ستون‌ها برای قاب دوطبقه: IPB200 ، برای قاب پنج طبقه: طبقات اول و دوم IPB 360 و طبقات دیگر IPB 200 و برای قاب هشت طبقه: طبقات اول تا سوم IPB 500 ، طبقات چهارم تا ششم IPB 360 و دو طبقه‌ی آخر IPB 200 است. هم‌چنین مقاطع تیرها شامل IPE270 و IPE300 می‌باشند.



شکل ۳ تصویر شماتیک قاب‌های ساختمانی مورد تحلیل (اعداد برحسب متر می‌باشند)

نتایج حاصل از روش‌های محاسبه‌ی بار انفجار و مقایسه‌ی آن‌ها

با توجه به این‌که نتایج نرم‌افزار A.T.-Blast در حقیقت حاصل از داده‌های میدانی و آزمایشگاهی می‌باشد و مورد تأیید مراجع معتبر علمی و نظامی است، در بسیاری از مقالات به‌عنوان معیاری برای کنترل و بررسی نتایج محاسبات مربوط به میزان بار انفجاری مورد استفاده قرار گرفته‌است [15]. به همین دلیل در این بررسی نیز از نتایج حاصل از این نرم‌افزار برای کنترل دقت روابط تجربی استفاده شده است. در ابتدا بارهای انفجاری حاصل از مواد منفجره با وزن‌های مابین ۱۰ تا ۲۰۰۰ کیلوگرم TNT (۱۰، ۲۰، ۳۰، . . . تا ۲۰۰۰ کیلوگرم) و فواصل مختلفی بین ۲ تا ۸۵ متر (۲، ۳، ٤، . . . تا ۸۵ متر)، توسط نرم‌افزار A.T.-Blast به‌دست آمده و سپس نتایج حاصل از فرمول‌های تجربی نیز محاسبه گردیده‌اند و این نتایج با هم مقایسه شده‌اند.

در مجموعه شکل‌های شماره‌ی (٤)، نتایج حاصل از محاسبه‌ی زمان تداوم بارگذاری t_d، برای وزن‌های ٤۰kg، ٥٦۰kg، ۱۱۰۰ kg و ۲۰۰۰ kg مواد منفجره TNT، که از فرمول‌های تجربی پیشنهادی توسط ایزدی‌فرد و ماهری (I & M) و لَم (Lam) محاسبه شده‌اند، با نتایج حاصل از نرم‌افزار A.T.-Blast مقایسه و میزان خطا نمایش داده شده است.

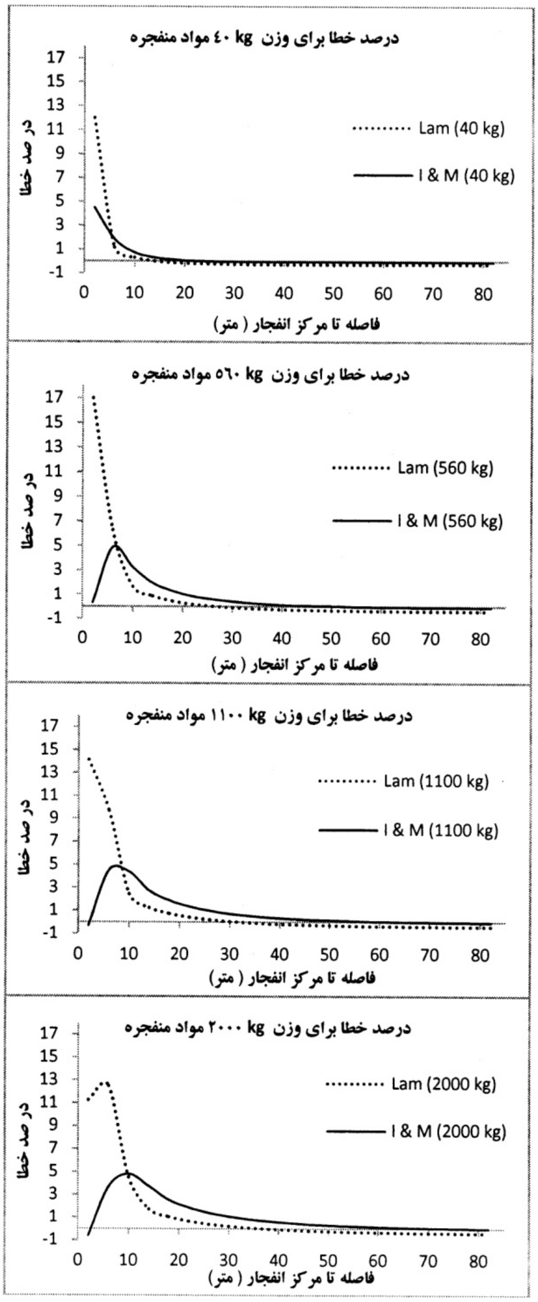
چنانچه از این شکل‌ها پیداست، رابطه‌ی مربوط به ایزدی‌فرد و ماهری در هیچ فاصله و با هیچ میزان خرج انفجاری، خطایی بیش از ۵ درصد ایجاد نمی‌کند. هم‌چنین کاملاً مشاهده می‌گردد که در فواصل بیش از حدود ۳۰ متر و برای وزن‌های مواد منفجره کمتر از ۱۰۰۰ کیلوگرم TNT، درصد خطای این رابطه بسیار کم خواهد بود تا جایی که در فواصل بیشتر به صفر نزدیک می‌گردد. ولی درباره‌ی رابطه‌ی مربوط به لَم باید گفت که این رابطه در فواصلی کمتر از حدود۱۰ متر دارای دقت مناسبی نمی‌باشد و درصد خطای آن تا حدود ۱۵ درصد هم می‌رسد که این میزان خطا نسبتاً زیاد است. ولی این رابطه در حجم‌های مواد منفجره‌ی زیاد (بیش از ۱۰۰۰ کیلوگرم) و نیز در فواصل بین ۱۰ تا ۳۰ متر از دقت بهتری نسبت به رابطه‌ی ایزدی‌فرد و ماهری برخوردار است ولی در فواصلی غیر از این، میزان خطای این رابطه به‌مراتب نسبت به خطای رابطه‌ی ایزدی‌فرد و ماهری بیشتر خواهد بود. همین موضوعات، یعنی خطای کمتر در غالب فواصل و وزن‌های معمول مواد منفجره، هم‌چنین محدود بودن میزان خطای رابطه‌ی ایزدی‌فرد و ماهری به کمتر از ۵ درصد، باعث ایجاد اطمینان بیشتری به این رابطه نسبت به رابطه‌ی لَم می‌شود.

در مجموعه شکل‌های شماره‌ی (۵)، نتایج حاصل از مقایسه‌ی بیشینه فشار واقع Pso برای حجم‌های ٤۰ kg، ٥٦۰ kg، ۱۱۰۰ kg و ۲۰۰۰ kg مواد منفجره TNT بین نتایج حاصل از فرمول‌های تجربی پیشنهادی براد و میلز با نتایج حاصل از نرم‌افزار A.T.-Blast مشاهده می‌شود.

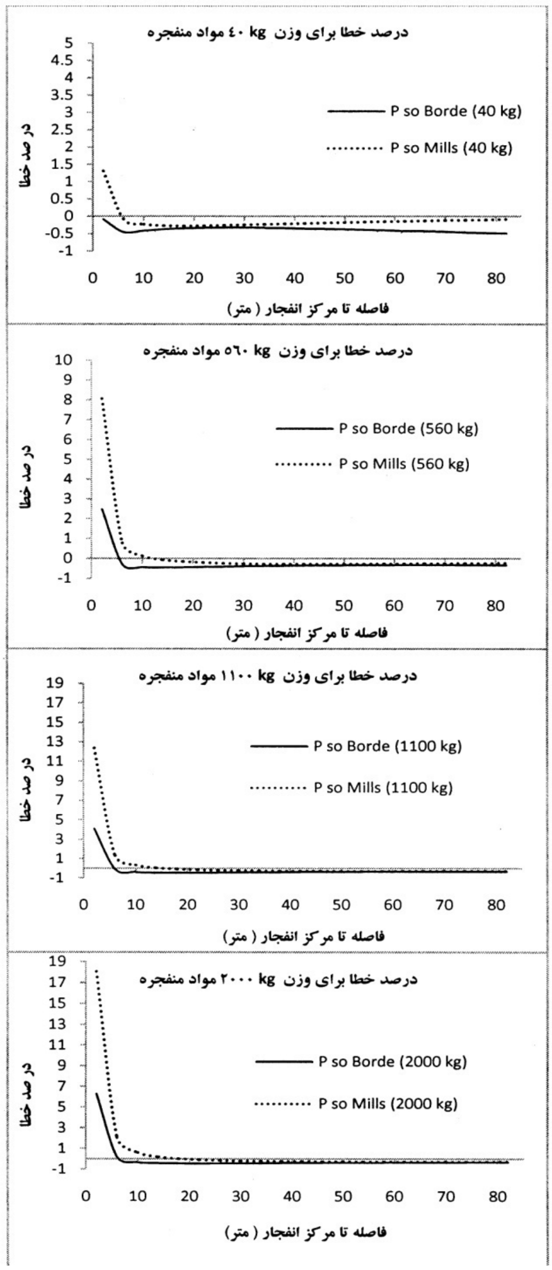
چنانچه از این شکل‌ها پیداست، رابطه‌ی مربوط به براد در غالب فاصله‌ها و با غالب میزان خرج‌های انفجاری، خطایی کمتر از ۵ درصد ایجاد می‌کند. هم‌چنین کاملاً مشاهده می‌گردد که در فواصل بیش از حدود ۸ متر، درصد خطای این رابطه بسیار کم (کم‌تر از ۰/۵ درصد) خواهد بود و در فواصل بیشتر به صفر نزدیک می‌گردد. ولی درباره‌ی رابطه‌ی مربوط به میلز باید گفت که این رابطه در فواصل کمتر از حدود ۸ متر دارای درصد خطایی حتی تا حدود ۱۹ درصد می‌باشد که این میزان خطا نسبتاً زیاد است و لذا در این محدوده، این رابطه دارای دقت مناسبی نمی‌باشد. ولی همین رابطه در غالب وزن‌های مواد منفجره، در فواصل بیش از ۱۰ متر از دقت به‌مراتب بهتری نسبت به رابطه‌ی براد برخوردار است (خطایی کمتر از ۰/۳ درصد). در مجموع و با دقت به همه‌ی این شرایط، یعنی خطای کمتر در مورد هر میزان فاصله (با تأکید بر فاصله‌ی بیش از ۱۰ متر) و هر حجم مواد منفجره، استفاده از رابطه‌ی میلز نسبت به رابطه‌ی براد از دقت بهتری برخوردار است ولی در فواصل کمتر از ۸ متر استفاده از رابطه‌ی براد نتایج دقیق‌تری به همراه خواهد

داشت.

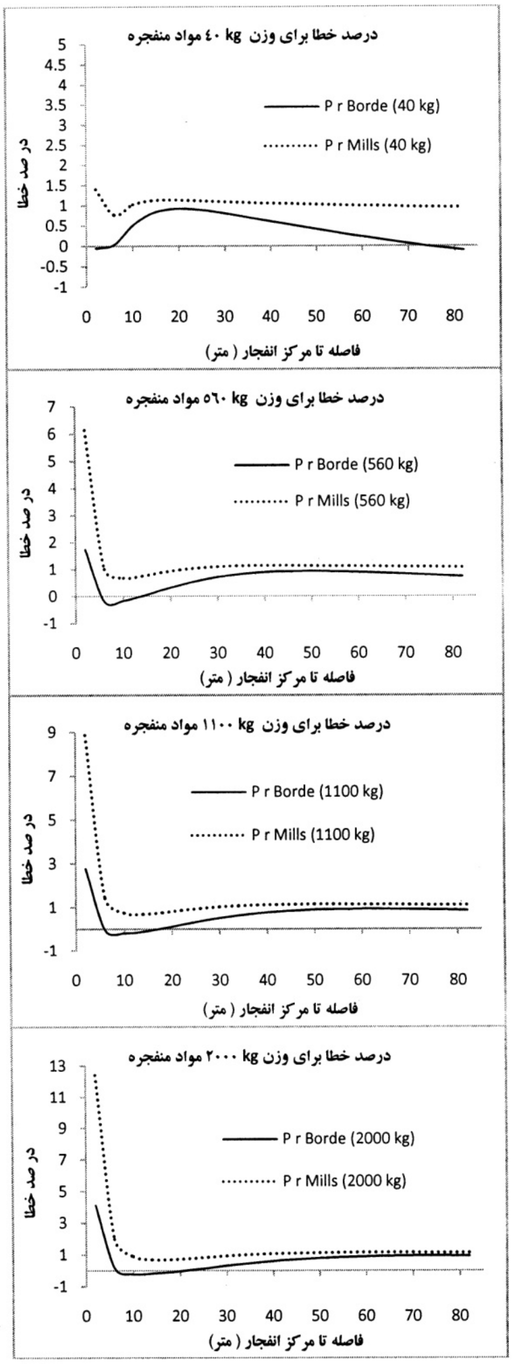
در مجموعـه شـکل‌هـای شـماره‌ی (٦) ، نتـایج حاصل از مقایسـه‌ی بیشـینه فشـار انعکاسـی P_r بـرای حجم‌های ٤۰ kg، ٥٦۰kg، ۱۱۰۰ kg و ۲۰۰۰ kg مـواد منفجره TNT بین نتایج حاصل از فرمول‌هـای تجربـی پیشنهادی براد و میلز با نتایج حاصل از نرم‌افزار A.T.-Blast مشاهده می‌شود.



شکل ٤ درصد خطای موجود در مقایسه‌ی روابط لَم (Lam) و ایزدی‌فرد و ماهری (I & M) با A.T.-Blast برای محاسبه‌ی دوره‌ی بارگذاری t_d



شکل ۵ درصد خطای موجود در مقایسه‌ی روش‌های براد و میلز با A.T.-Blast برای محاسبه‌ی بیشینه فشار واقع P_{so}



شکل ٦ درصد خطای موجود در مقایسه‌ی روش‌های براد و میلز با A.T.-Blast برای محاسبه‌ی بیشینه فشار انعکاسی P_r

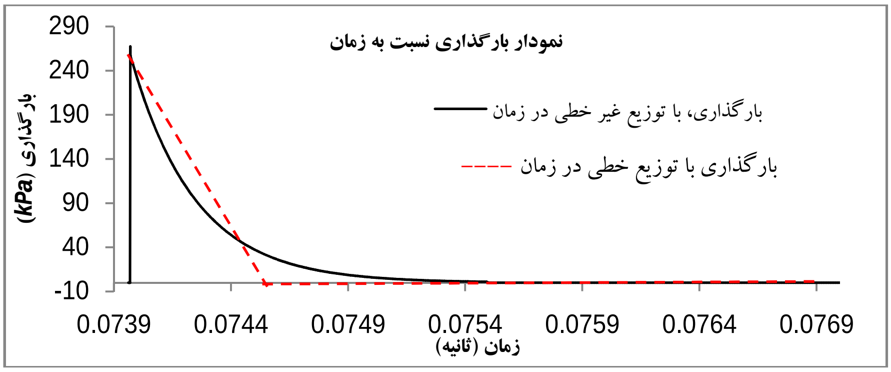
رابطه‌ی مربوط به براد در بیشتر فاصله‌ها و با میزان خرج‌های انفجاری مختلف، کم‌تر از ٤ درصد خطا ایجاد می‌کند. در فواصل بیش از حدود ۸ متر، درصد خطای این رابطه بسیار کم (کم‌تر از یک درصد) خواهد بود. درحالی که درباره‌ی رابطه‌ی مربوط به میلز باید گفت که این رابطه دارای خطای زیادی در فواصل کمتر از حدود ۸ متر است که این خطا تا حدود ۱۳ درصد می‌باشد. هم‌چنین این رابطه در همه‌ی وزن‌های مواد منفجره، در همه‌ی فواصل از دقت به‌مراتب کمتری نسبت به رابطه‌ی براد برخوردار است. در مجموع، برخلاف نتایج حاصل از مقایسه‌ی بیشینه فشار P_{so}، برای محاسبه‌ی بیشینه فشار انعکاسی P_r، با توجه به خطای کمتر، استفاده از رابطه‌ی براد نسبت به رابطه‌ی میلز از دقت بهتری برخوردار است.

محاسبه و مقایسه‌ی پاسخ قاب‌ها به بار انفجاری

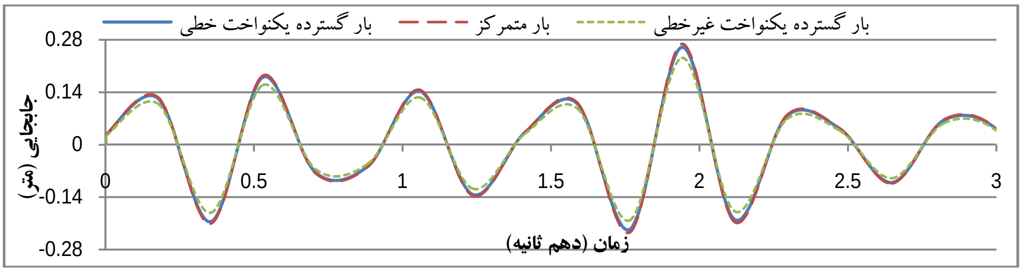
در بخش قبل روابط موجود برای محاسبه‌ی میزان بار و زمان اعمال آن بر سازه مورد بررسی قرار گرفتند. در این بخش به بررسی نحوه‌ی اعمال این بار بر سازه می‌پردازیم. نکته‌ی قابل توجه این است که با وجودی‌که دیوارهای ساختمان پس از برخورد موج انفجار تخریب می‌شوند، ولی با توجه به دوره‌ی بسیار کوتاه بارگذاری، این بار عملاً قبل از تخریب دیوارها به عناصر باربر سازه منتقل خواهد شد. لذا در این مقاله با وجود این‌که دیوارها مدل نشده‌اند، ولی بار انفجاری وارد بر آن‌ها به ستون‌ها منتقل شده است. برای محاسبه و اعمال بار انفجاری مؤثر بر ساختمان از نتایج بیشینه بار انعکاسی مربوط به نرم‌افزار A.T.-Blast استفاده شده‌است. نمودار بارهای وارد بر سازه در این مقاله، در شکل (۷) مشاهده می‌گردد. برای این‌که بتوان توزیع بار در زمان را به‌صورت خطی فرض کرد، این نمودار باید به‌گونه‌ای در نظر گرفته‌شود که فاکتور ضربه برای این حالت با نمودار اصلی مساوی باشد. چنان‌که در نمودار بارگذاری (شکل شماره ۷) مشاهده می‌شود، زمان رسیدن موج انفجاری به سازه ۰/۰۷۳۹۷ ثانیه است که در هنگام تحلیل سازه‌ها، این زمان به عنوان مبدأ زمانی، (زمان صفر) فرض گردیده‌است.

در شکل شماره‌ی (۸) و جدول شماره‌ی (۱)، بیشینه جابه‌جایی مرکز جرم بام در حالت‌های مختلف بارگذاری با هم مقایسه گردیده‌است. نتایج نشان

می‌دهد که می‌توان با تقریب خوبی که کاملاً محافظه‌کارانه است، به‌جای بارگذاری انفجاری با توزیع غیرخطی نسبت به زمان، از بارگذاری انفجاری با توزیع خطی نسبت به زمان استفاده نمود. هم‌چنین نتایج ناشی از بارگذاری گسترده، مشابهت زیادی با نتایج حاصل از بارگذاری به‌صورت متمرکز در تراز طبقات دارد. اما این مطابقت با افزایش تعداد طبقات، کمتر می‌شود.



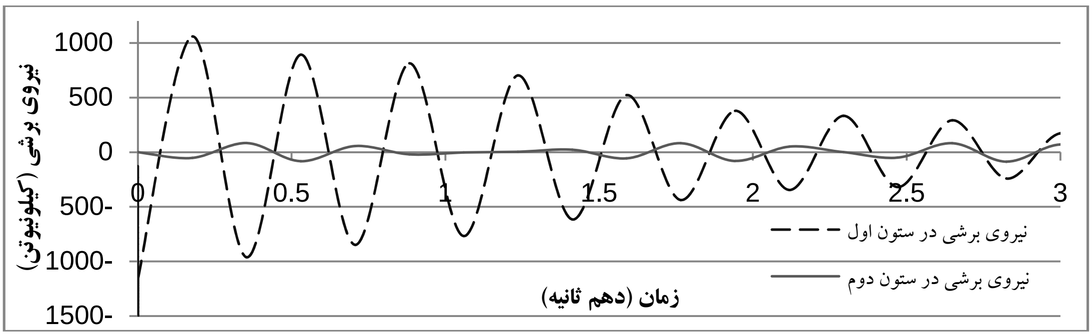
شکل ۷ نمودار بارگذاری‌های مورد استفاده در این مقاله



شکل ۸ مقایسه‌ی جابه‌جایی تراز بام در ساختمان ۵ طبقه با توجه به شرایط بارگذاری‌های متفاوت

جدول ۱ بیشینه جابه‌جایی مرکز جرم بام در قاب‌ها، تحت اثر بارهای متفاوت (cm)

	بار گسترده، با توزیع غیر خطی در زمان	بار گسترده، با توزیع خطی در زمان	بار متمرکز، با توزیع خطی در زمان
قاب ۲ طبقه	۸/۰۰	۸/۶۸	۸/۶۹
قاب ۵ طبقه	۲۳/۱۷	۲۶/۰۰	۲۶/۴۱
قاب ۸ طبقه	۳۰/۲۱	۳۱/۵۰	۳۲/۹۴



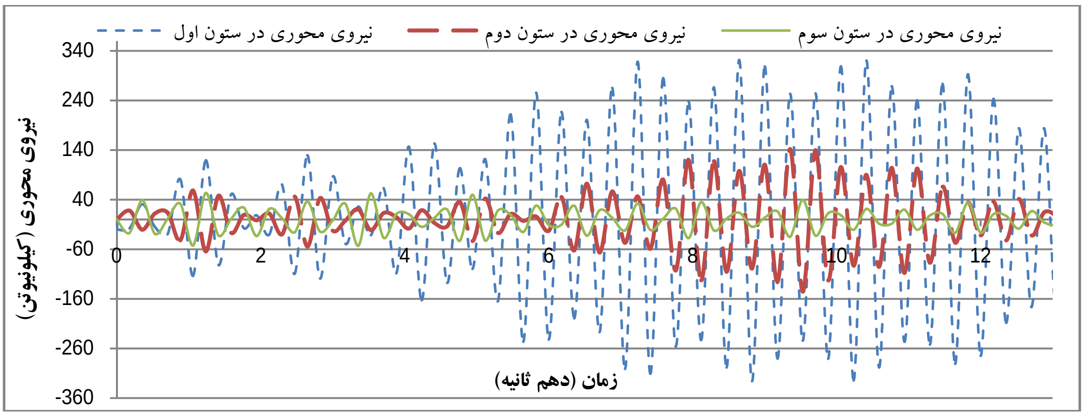
شکل ۹ مقایسه‌ی نیروی برشی در ستون‌های ردیف اول و دوم قاب ۵ طبقه

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته، به‌طور قطع می‌توان گفت که بیشترین تنش در ستون‌های اول سازه (نزدیک‌ترین ستون‌ها به محل انفجار) رخ می‌دهد. این تنش‌ها شامل تنش‌های فشاری، کششی و برشی هستند. همچنان که در شکل‌های شماره‌ی (۹) و (۱۰) مشخص است، بحرانی‌ترین و بزرگ‌ترین نیروی وارد بر ستون‌ها، نیروی برشی است. تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای بارهای انفجار بسیار مشابه با بارهای زلزله می‌باشد، فقط با توجه به کم بودن زمان تداوم بار لازم است که طول گام‌های زمانی بسیار کوچک انتخاب گردد و در ضمن با توجه به آهنگ سریع کرنش لازم است که مقاومت مواد در ضریب افزاینده ضرب گردد [20].

در جدول شماره‌ی (۲) حداکثر نیروی برشی در ستون‌های طبقه‌ی اول قاب‌های مختلف ارائه گردیده‌است. نکته‌ی مهم این است که میزان حداکثر نیروی برشی ستون اول (نزدیک‌ترین ستون به محل انفجار) با افزایش تعداد دهانه‌ها تغییر چندانی نمی‌یابد.

با توجه به این‌که این بیشینه نیروی برشی، در همان زمان‌های اولیه (حدود ۰/۰۰۰۵ تا ۰/۰۰۵ ثانیه آغازین بارگذاری) رخ می‌دهد و هنوز کلیت سازه پاسخی به بارگذاری نداده است، مشاهده می‌شود که این میزان بیشینه در ستون طبقه‌ی اول، با افزایش تعداد طبقات ساختمان افزایش چشم‌گیری نمی‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که بیشینه نیروی برشی در دیگر ستون‌ها باهم برابر است.

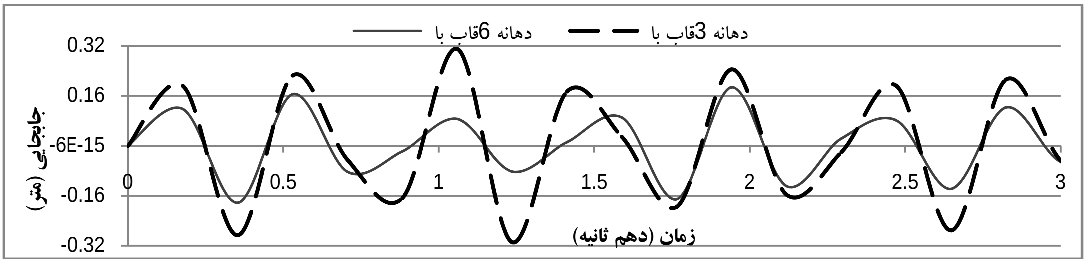
در شکل شماره‌ی (۱۱) جابه‌جایی مرکز جرم بام برای قاب ۸ طبقه در دو حالت سه‌دهانه و شش‌دهانه با هم مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که قاب‌هایی که تعداد دهانه‌های بیشتری دارند، جابه‌جایی کلی کمتری نسبت به قاب‌های با دهانه‌های کمتر دارند که این مسأله می‌تواند به‌دلیل سختی بیشتر جانبی این قاب‌ها باشد. به عبارت دیگر با افزایش تعداد دهانه‌ها (تعداد ستون‌ها در یک قاب عمود بر جهت انفجار) می‌توان جابه‌جایی‌های ناشی از انفجار را در ساختمان کاهش داد.



شکل ۱۰ مقایسه‌ی نیروی محوری در ستون‌های ردیف اول، دوم و سوم از قاب ۲ طبقه، ۳ دهانه

جدول ۲ حداکثر نیروی برشی ستون‌های طبقه‌ی اول، در قاب‌های متفاوت (کیلونیوتن)

نوع قاب	۲ طبقه، ۳ دهانه	۲ طبقه، ٦ دهانه	۵ طبقه، ۳ دهانه	۵ طبقه، ٦ دهانه	۸ طبقه، ۳ دهانه	۸ طبقه، ٦ دهانه
ستون ردیف اول	۱۵۲۵	۱۵۲٦	۱۸۲۸	۱۸۲۸	۲۲۵۳	۲۲٤٤
ستون ردیف دوم	۱۰٤	٦۳	۱۵۲	۹۸	۲۳۲	۱٤۱
ستون ردیف سوم	۱۰٤	٦۳	۱۵۲	۹۸	۲۳۲	۱٤۱



شکل ۱۱ مقایسه‌ی جابه‌جایی مرکز جرم بام برای قاب ۸ طبقه، در دو حالت ۳ دهانه و ٦ دهانه

نتیجه‌گیری

برای محاسبه‌ی فشار ناشی از انفجار روابط متعددی توسط محققان ارائه شده‌است. از میان این روابط، می‌توان به روابط ایزدی‌فرد و ماهری و لَم برای محاسبه‌ی دوره بارگذاری و روابط براد و میلز برای محاسبه‌ی بیشینه فشار اشاره نمود. با توجه به بررسی‌های انجام شده در این مقاله، موارد زیر به‌دست آمده است:

۱- روابط ایزدی‌فرد و ماهری به‌طور کلی نسبت به روابط لَم دقت بیشتری دارند. خطای این روابط حداکثر به ۵ درصد محدود می‌شود.

۲- در فواصل کم از محل انفجار درصد خطای روابط لَم زیاد است.

۳- در مورد روابط مربوط به بیشینه فشار P_{so} ، در مجموع استفاده از رابطه‌ی میلز دقت بهتری نشان می‌دهند.

٤- در مورد روابط مربوط به بیشینه فشار انعکاسی P_r ، بر خلاف روابط مربوط به بیشینه فشار P_{so}، استفاده از رابطه‌ی براد، در مجموع دقت بیشتری را نشان می‌دهد.

پس از مدل‌سازی سازه و بارگذاری انفجاری بر روی آن در نرم‌افزار، نتایج زیر قابل ذکر است:

۱- برای مدل کردن بارهای ناشی از انفجار بر روی سازه، استفاده از بارهای متمرکز در تراز طبقات با توزیع خطی نسبت به زمان، دارای دقت کافی است و میزان خطای آن نسبت به حالت بار گسترده با توزیع غیرخطی نسبت به زمان، ناچیز می‌باشد.

۲- بارهای ناشی از انفجار در ستون‌های نزدیک به محل انفجار، ایجاد نیروی برشی نسبتاً زیادی می‌کند که این نیرو در ستون‌های ردیف‌های بعد به‌شدت کاهش می‌یابد.

۳- افزایش تعداد دهانه‌های قاب تأثیر چندانی بر نیروهای ایجاد شده در ستون‌های ردیف اول (نزدیک به محل انفجار) ندارد، اما باعث کاهش تغییرمکان جانبی کلی قاب می‌گردد. از طرف دیگر با افزایش تعداد طبقات ساختمان، نیروهای ایجاد شده در ستون‌های طبقه‌ی پایین ساختمان افزایش چندانی نمی‌یابد، بنابراین ساختمان‌های کوتاه به‌دلیل بالا بودن نیروهای ناشی از انفجار در آن‌ها نسبت به نیروهای طراحی معمولی سازه، در مقایسه با ساختمان‌های بلند دارای آسیب‌پذیری بیشتری در مقابل بارهای ناشی از انفجار خارج از ساختمان می‌باشند. البته در این مورد نیاز به بررسی‌های بیشتر و بر روی تعداد قاب‌های بیشتری می‌باشد تا بتوان به‌طور قطع اظهار نظر نمود.

مراجع

1. Longinow, A. and Mniszewski, K.R., "Protecting Buildings against Vehicle Bomb Attacks", Practice Periodical on Structural Design and Construction, Vol. 1, 1, pp. 51-54, (1996).
2. U.S. Department of Homeland Security, "Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings", Federal Emergency Management Agency, FEMA 426, (2003).

3. U.S. Department of Homeland Security, "Primer for Design of Commercial Buildings to Mitigate Terrorist Attacks", Federal Emergency Management Agency, FEMA 427, (2003).
4. TM5-855-1, "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapons", U.S. Department of the Army, Washington D.C., (1990).
5. TM 5-1300, "Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions", Joint Departments of the Army, Air Force and Navy, Washington D.C., (1990).
6. Applied Research Associates (ARA), Inc., "A.T.-Blast program", Protective Glazing Council, (2007). http://www.protectiveglazing.org
7. Brode, H.L., "Numerical solutions of spherical blast waves", *Journal of Applied Physics,* Vol.26, Issue: 6, pp. 766-775, (1955).
8. Newmark, N.M. and Hansen, R.J., "Design of Blast Resistant Structures", Shock and Vibration Handbook, Vol. 3, Eds. Harris and Crede, McGraw-Hill, New York, USA, (1961).
9. Mills, C.A., "The Design of Concrete Structure to Resist Explosions and Weapon Effects", *Proceedings of the 1st Int. Conference on concrete for hazard protections,* Edinburgh, UK, pp. 61-73, (1987).
10. Mays, G.C. and Smith, P.D., "Blast Effects on Buildings", Thomas Telford Service Ltd, London, E14 4JD. 121pp., (1995).
11. Lam, N., Mendis, P. and Ngo, T., "Response Spectrum Solutions for Blast Loading", *Electronic Journal of Structural Engineering,* Vol. 4, pp. 28-44, (2004).
12. Izadifard, R.A. and Mahrei, M.R., "Application of DBD Method to Assess the Level of Structural Damage Due to Blast Loads", *Journal of Mechanical Science and Technology,* (2008).
13. Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A. and Ramsay, J., "Blast Loading and Blast Effects on Structures – An Overview", *Electronic Journal of Structural Engineering,* (2007).
14. Zhu, F. and Lu, G., "A Review of Blast and Impact of Metallic and Sandwich Structures", *Electronic Journal of Structural Engineering,* (2007).
15. Lee, K., Kim, T. and Kim J., "Local Response of W-Shaped Steel Columns Under Blast Loading", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 31. No.1, pp. 25-38, (2009).
16. Hadianfard, M.A., Farahani, A. and Jahromi A.B., "On the effect of steel columns cross sectional properties on the behaviours when subjected to blast loading", *Journal of Structural Engineering and Mechanics,* Vol. 44, No. 4, pp. 449-463, (2012).
17. Baker, W.E., "Explosions in Air", University of Texas Press, Austin, TX, (1973).
18. Federal Emergency Management Agency, "Primer for Design Safe School Projects In Case Of Terrorist Attacks", FEMA 428, (2003).
19. ANSYS 11. , "Reference Manual. Element Reference", Element Library.
20 .Soroushian, P. and Choi, K.B., "Steel Mechanical Properties at Different Strain Rates", *Journal of Structural Engineering,* ASCE, Vol. 113, No. 4, pp. 663-672, (1987).